

戴維生與物質波

張秋男、陳瑞虹

國立台灣師範大學物理系

歷史上“重大”物理事件的發生有時來自於“偶然”(accidental),然而“偶然”的背後卻都有著科學研究工作者的努力與執著,沒有了後者,前者的發生率將幾近於零,戴維生一革末實驗證實了德布羅意的物質波即其一例。本文將從歷史的角度切入,除敘述戴維生的個人小檔案外,並將其對研究的始末做一簡單描述,讓我們共同體會這一重大物理事件—物質波的實驗證明歷程背後讓人省思的地方。

一、歷史回顧

德布羅意在 1923 年公布他的物質波假設時的前四年 1919 年,戴維生已在貝爾實驗室開始從事電子與金屬表面散射實驗,實驗的目的在探討電子在經過金屬表面彈性散射以後的角分佈情形,第一次的結果于 1921 年發表¹,第二次的結果是對鉛的表面的散射結果于 1923 年發表²。研究的目的均與物質波無關。雖然在 1925 年波恩(Born)的學生愛沙索爾(W.Elsasser)³曾預測粒子的波動性可經由電子和晶體的散射觀測到,並相信戴維生的電子與鉛的散射的角分佈即為其一明證。但戴維生等人並不這樣認定,因為他們發現電子經不同金屬表面散射後的角分佈均類似,與晶体結構不形成密切的關聯。

事情發生了,那是 1925 年的四月,戴維生等人從事實驗的真空腔發生了液態空氣瓶的爆裂事件,使當時作實驗的鎳表面氧化,他們爲了去除氧化層而將鎳靶在真空中及在氫氣中於各種高溫下加熱後冷卻。再作實驗時他們立即發現電子的角分佈圖樣完全改變了。他們把這個結果寄送給波恩(Born),請求作進一步的解釋。波恩與福蘭克(Franck)利用愛沙索爾(W.Elsasser)的推導加以計算認爲戴維生等人的結果與電子的德布羅意波的性質有關,並建議戴維生設計並從事以尋找電子波動所引起的繞射圖樣的電子散射實驗。實驗於是開始,於 1927 年四月在“Nature”公布其主要的結果。並在 1927 年十二月在物理評論(Physical Review)⁴發表一長達 36 頁的論文,詳述其實驗的儀器、步驟及結果等。

戴維生的這個實驗結果使他與湯木生(G.P.Thomson)因物質波的實驗證明而共同獲得 1937 年的諾貝爾獎。

二、戴維生的小檔案(Clinton L. Davisson, 1881-1958)

戴維生在高中時候即在物理與數學上展露才華。他上高中時的年紀比較大些,21 歲才從高中畢業,畢業後他因爲物理與數學的優異成績得到獎學金進入芝加哥大學求學,那兒他受到米立坎(Robert A.Millikan)教授的影響。但一年後,

因為經費問題而離開學校到布魯明頓(Bloomington)的電話公司上班。1904年，雖然他沒有大學文憑，卻由於米立坎的介紹進入普渡大學物理系當助教。後來他又離開普渡大學再度得到米立坎的幫忙而到普林斯頓大學物理系兼任講師，在那兒他跟著金斯(James Jeans) 教授及瑞察森(O.W.Richarson) 教授學習，並返回芝加哥大學修暑期課程，於1908年得到學士學位。

普林斯頓大學爾後在1910-1911年給他獎學金(fellowship)，讓他可全時間研究來完成他的博士學位。他的博士論文是在瑞察森教授的指導下完成，題目是“鹼土金屬鹽類的正離子熱發射”(Thermal Emission of Positive Ions from Alkaline Earth Salt)。瑞察森本人也因為發現熱離子現象的基本定律而獲得1929年的諾貝爾獎。

在完成博士學位後，他曾到卡內基理工學院(Carnegie Institute of Technology)工作，也曾到英國卡文迪西(Cavendish)實驗室，在湯木生(J.J.Thomson)教授的指導下從事研究工作。在第二次大戰期間，他在西方電氣公司(Western Electric Company)工作，戰後則繼續成為貝爾電話實驗室(Bell Telephone Lab.)的研究人員，於1919年開始從事電子與金屬表面散射實驗研究。

戴維生在完成了電子與晶体繞射實驗後，雖然仍繼續其電子的散射實驗，但興趣卻轉往實用物理方面，如電子光學(Electron Optics)等，在第二次大戰期間，他在電子儀器及晶体物理方面均有貢獻。他於1946年退休並到維吉尼亞大學作訪問教授直到1958年2月1日遲世為止。戴維生的一生得到許多的榮譽學位、獎章、及獎賞等。

三、戴維生—革末實驗

在1925年4月實驗意外發生後，因清理鎳靶而得到完全不同的電子角分佈圖樣，經過波恩及福蘭克的建議，知道產生電子角分佈圖樣變化的原因可能是鎳靶表面不再是多晶結構，而有單晶面形成所致。於是戴維生與革末利用鎳單晶來作為散射靶，並重新設計實驗，此時不但電子偵測器可以作 20° - 90° 的角分佈測量，而鎳靶也可以以入射電子方向為轉軸旋轉。整個設備的真空度可達到 10^{-3} mm 汞柱高。鎳單晶是沿著{111}面用鑽石刀切下的並作了打光及嚴格的鑑定。實驗簡單的示意圖如下(圖1)

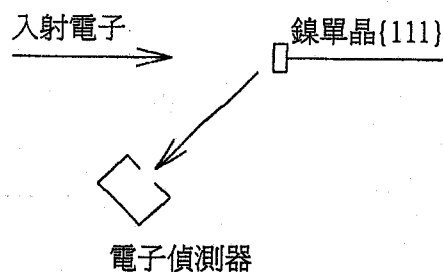


圖1. 戴維生-革末實驗的示意圖

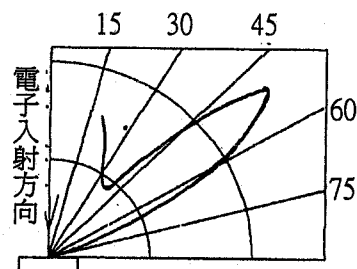


圖2. 54eV 電子在鎳{111}面散射的角分布圖樣

他們實驗結果中最具代表性，且常為教課本所引用的即為入射電子能量為 54eV 時的角分佈圖樣，如圖 2 所示。

戴維生與革末對這個結果的解釋是非常小心謹慎的。他們根據鎳單晶的晶体結構解釋。圖 2 中 50° 散射角的最強散射線是鎳單晶表面原子排列成的“光柵”(grating)對入射電子的波動產生繞射而形成的。從圖 2 的幾何知道，這種繞射符合

$$d \sin \theta = n \lambda \quad \dots \dots \dots (1)$$

的光柵繞射公式，其中 n 為正整數。

若電子為德布羅意波，則 54eV 的電子按照德布羅意的公式，其波長為 $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$ = 1.67Å，在以下的討論中，我們將知道光柵間距 $d = 2.15\text{Å}$ ，代入(1)式中($n=1$)知繞射線產生於 $\theta = 51^\circ$ 的地方，非常符合戴維生-革末時驗的結果，電子的波動性也因而得到證實。

有關“原子光柵”的間距 $d = 2.15\text{Å}$ ，可由鎳單晶的晶体結構得到。圖 3 為面向鎳 {111} 面往下看的原子排列情形。○表第一層原子，●表第二層原子，□表第三層原子，而第四層原子則在第一層原子的正下方。

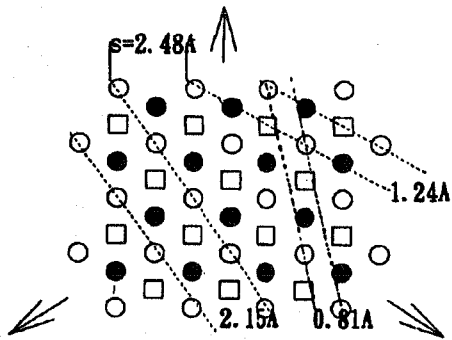


圖3. 鎳 {111} 面原子排列的下視圖

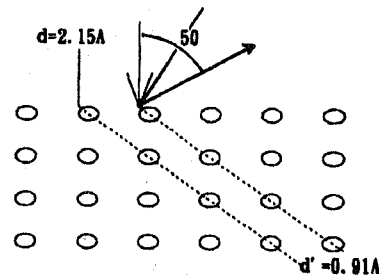


圖4

因鎳單晶的晶格常數 $a = 3.51\text{Å}$ ，且為立方體面心結構，故原子○與原子○的距離 s 為 $\frac{1}{\sqrt{2}} a = 2.48\text{Å}$ ，兩排○原子的間距為 $\frac{\sqrt{3}}{2} s = 2.15\text{Å}$ ，圖 3 中箭頭所指方向為與柵距為 2.15Å 的“原子光柵”的垂直方向，圖中可以看到三個這樣的方向。要產生光柵繞射的圖樣，入射線與繞射線所形成的反射面必需是平行於三個箭頭方向之一。圖 2 電子角分佈圖樣即是在這樣的條件下得到的，其橫軸方向為圖 3 三個箭頭方向之一。

有許多的近代物理教本，對上述的實驗結果常利用 X 光布拉格單晶繞射的公式，即

$$2d' \sin \theta_0 = n \lambda, \quad \dots \dots \dots (2)$$

其中 d' 為單晶面與面的距離， θ_0 為布拉格角，來說明圖 2 實驗的電子角分佈圖樣。其解說是依據圖 4 的原子排列來說明的。圖 4 是一側視的原子排列圖， $d=2.15\text{\AA}$ ，故 $d'=d \sin 25^\circ=0.91\text{\AA}$ 而 $\theta_0=90^\circ-\frac{50^\circ}{2}=65^\circ$ ，將 d' 及 θ_0 代入(2)式可得 $\lambda=1.65\text{\AA}$ 接近於 54eV 的物質波長 1.67\AA 。

我們在此特別提出這種完全仿造 X 光布拉格繞射來解說實驗的結果並不恰當，其理由為：

- (1) 與戴維生-革末實驗結果的原來解釋不符。該實驗的電子繞射方向係由鎳原子在 $\{111\}$ 表面排列所形成的“原子光柵”繞射而成。如圖 3 所示，虛線為表層“原子光柵”可能的光柵間距，分別為 2.15\AA ， 1.24\AA 及 0.81\AA 。戴維生-革末的實驗數據中，明顯的顯示了有 2.15\AA ，及 1.24\AA (未在本文中討論) 之光柵間距。
- (2) 如果實驗結果，仿造 X 光布拉格繞射的情形解釋，則是電子由 $\{111\}$ 面垂直方向入射(見圖 4)，再由晶面間距為 0.91\AA 之晶面繞射而出。但依據鎳單晶的三維晶體結構，我們並不能找出有與 $\{111\}$ 面夾角 25° 且間距為 0.91\AA 之對應晶面。比較接近且有可能的是 $\{123\}$ 晶面；其晶面間距為 0.94\AA ，它與 $\{111\}$ 面的夾角呈 22.2° 。假若考慮到金屬表面對電子具有吸引力的電位，電子的德布羅依波會看到類似 X 光在界面所看見的折射率。對電子而言，因為是引力電位，它所看到的金屬界面的折射率大於 1，因此 $\{123\}$ 面有可能是三維繞射的晶面⁶。但是 $\{123\}$ 面的布拉格繞射強度與 $\{111\}$ 面“原子光柵”的繞射強度相比，徵諸現代低能量電子繞射儀(LEED)的繞射圖樣，應是非常微弱的。另外，戴維生-革末的實驗中，有一很重要的現象，即偵測器必須在圖 3 的三個箭頭方向之一時，繞射強度形成峰值，此時入射線與繞射線所形成的反射面恰好校準到柵距為 2.15\AA 的“原子光柵”的分光方向(圖 3 的三個箭頭方向之一)。因此，戴維生-革末的繞射譜，特別是大家所引用的 54eV 的電子角分布圖，其主要效應該是 $\{111\}$ 面的“原子光柵”繞射譜；此時電子深入鎳原子表層，由其他單晶面(可能為 $\{123\}$ 面)造成繞射的貢獻即使有也極其微弱。

四、結語:

本文寫作的最初動機是對利用 X 光晶体布拉格繞射解釋戴維生-革末實驗結果質疑而起。在資料的研讀收集中，覺得此一物理重大事件--物質波的實驗證明之一其歷程的風味特殊，可提出來與大家分享。希望借由本文，對我輩從事物理教育及物理研究的工作者有所啓迪與勉勵。

五、誌謝

本文承蒙師大物理系林明瑞及沈青嵩兩位教授撥空閱讀並提供寶貴意見，使本文對第 3 節的討論更臻完備特此致謝。

參考資料：

1. Davisson and Kunsman, Science 64, 522(1921)
2. Davisson and Kunsman, Phys.Rev.22, 242(1923)
3. W.Elsasser, Naturwiss, 13, 711(1925)
4. C.Davisson and L.H.Germer, Phys.Rev.30, 705(1927)
5. R.M.Bozorth,Phys.Rev.26.390(1925)
6. 當電子能量增大時，金屬表面對電子的吸引力效應增強，此現象在參考資料 4 中也有討論。